

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
DISEÑO, SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA
RED LR-NGPON2.**

**AUTORES:
CRISTIAN STEVEN CARRILLO GUALOTO
ROBERT ANDRÉS CASA TORRES**

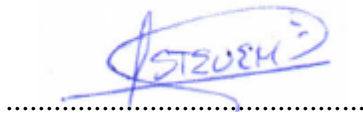
**TUTOR:
GERMÁN VICENTE ARÉVALO BERMEO**

Quito, agosto del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Cristian Steven Carrillo Gualoto y Robert Andrés Casa Torres, con documentos de identificación N° 1718585274 y N° 1722597190 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: **“DISEÑO, SIMULACIÓN, Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA RED LR-NGPON2”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Cristian Steven Carrillo Gualoto
CI: 1718585274



Robert Andrés Casa Torres
CI: 1722597190

Quito, agosto del 2019

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, “DISEÑO, SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA RED LR-NGPON2” realizado por Cristian Steven Carrillo Gualoto y Robert Andrés Casa Torres, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2019



Germán Vicente Arévalo Bermeo

CI: 010315250-0

DEDICATORIA

Tantas cosas que se viene a la cabeza, tantas personas, tantos momentos. Parece ayer que estábamos todos juntos alrededor de una mesa siempre en familia, pero nada es para siempre, ojalá la vida nos permita compartir más momentos juntos. A todos muchas gracias comenzando por nuestro pilares Papa Betito y Mamita María, sus 6 hijos 10 nietos y a su primer bisnieto, a mis abuelitos mis segundos papás gracias por los consejos, sus historias, sus alcahuetas créame que han servido de mucho, a mis tíos Susy, Wilo, Edy, Carlos, Paty gracias por siempre estar ahí enseñándonos que la vida es dura pero siempre les tenemos de impulso, a mis tías políticas Myre, Moni C, Moni H; a mis primos, Javi gracias por ver siempre lo bueno de todos ya nos volveremos a ver donde estés vas a estar orgulloso, Erick, David, gracias por su compañía por su apoyo, por su tiempo la vida es corta alcancen sus sueños, saben que si necesitan algo voy a estar ahí pase lo que pase Dany, Faty, Martin, Vale, Matis, pequeños gracias por su alegría en este mundo tan cambiante una sonrisa suya es el motor perfecto espero que siempre sigan así de alegres; recuerden que tienen familiares que nunca se dieron por vencidos que siempre intentan salir adelante, siendo buenas personas, buenos amigos, espero compartir mucho tiempo con ustedes.

Un agradecimiento especial a mi mamá no tengo palabras para agradecerte por todo, créame ma que sin tu compañía no fuera nada, quiero que sepas que siempre voy a estar contigo tuvimos demasiados problemas, pero los vamos superando, perdón por no ser el hijo que te mereces perdón por siempre discutir y nunca quedarme callado, te quiero ma y cada logro es por TI y para TI.

A mi hermano, aunque no dudaría en dar la vida por cada uno de mis primos, por ti me daría el modo de volver y dar la vida de nuevo, eres mi vida y aunque a veces me haces enojar sin ti me moriría, escucha los consejos de los demás, se bueno, se honesto la vida es corta comete el mundo. Vivan la vida y la familia es lo más importante.

Cristian Steven Carrillo Gualoto.

DEDICATORIA

*En el transcurso de mi vida he sido testigo de un sin número
de eventos, mismos que me han llevado a la felicidad
completa, también recuerdo aquellas experiencias tristes
que marcaron mi vida, pero son obstáculos que poco a poco
los he superado.*

*Vengo de una familia pequeña donde pese a las necesidades
nunca me faltó el cariño y afecto de ellas.*

*Con el más sincero sentimiento quiero dar las gracias a mi
Mami Olguita, ya que sin ella todo esto no fuera posible,
madrecita hermosa gracias por creer todos los días en mí,
por cuidarme, por alentarme hacer una mejor persona, y
también doy las gracias por reprenderme y encaminarme de
nuevo en el sendero del bien. Este es el final de una parte de
nuestra historia, y doy gracias a Dios que me permitió
compartirlo junto a usted.*

*De igual manera agradezco a mi hermana, mi cómplice, mi
amiga y confidente la que me ha llevado a culminar esta
etapa de mi vida, la que no me dejó caer en los momentos
difíciles, la que siempre me brindó su hombro como
consuelo, por todo eso y mucho más te doy las gracias.*

*En esta pequeña parte quise hacer un paréntesis para
destacar mi afecto a una gran persona que más que mi
amigo es como mi hermano Jover.*

*Este pequeño logro también se lo dedico a mi Ángel del
cielo, aunque hoy no esté presente, siempre conservo de mi
padre todos los hermosos recuerdos, guardo en mi memoria
los valores que me enseñó y no se me olvidan las
tribulaciones que por mí pasó.*

*En este día puedo decir con orgullo, que tuve el mejor padre
del mundo, al que le rindo homenaje hoy.
¡Gracias Padre, aquí se te recuerda y nunca se te olvida!*

Robert Andrés Casa Torres

DISEÑO, SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA RED LR-NGPON2.

DESIGN, SIMULATION AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF AN LR-NGPON2 NETWORK.

Cristian Carrillo Gualoto¹, Robert Casa Torres¹

Resumen

En este artículo se estudia mediante simulaciones, utilizando el software OptSim, y experimentalmente el desempeño de una red NGPON2 de larga distancia (LR-NGPON2) con cuatro canales a 10 Gb/s. Se evaluó la tasa de bits errados (BER) y la penalización de la ruta óptica (OPP). Los resultados experimentales muestran que la penalidad de un enlace NGPON2 es de 1 dB a 45 km y 3 dB a 70 km. Las simulaciones mostraron como resultado una penalidad de 1.5 dB a 45 km y 11 dB a 70 km con respecto a una transmisión a 20 km. La OPP determinada experimentalmente fue de 0.5 dB por cada km de fibra añadida a la red de distribución óptica (ODN), mientras que la simulación dio una OPP de 0.24 dB/km.

Palabras Clave: PON, NG-PON2, TWDM, OptSim, Matlab, OOK, NRZ, Bit Error Rate, Optical Path Penalty.

Abstract

In this paper it is presented the simulated and experimentally verified performance of a 4-channel 10Gb/s long-reach NGPON2 (LR-NGPON2). It was evaluated the bit error rate (BER) and the optical path penalty (OPP). Experimental results show a penalty of 1 dB and 3 dB for passing from 20 km to 45 km and 70 km of link-length, respectively. Simulation results differ from the experimental, since it was obtained a penalty of 1.5 dB for 45 km and 11 dB for 70 km. The experimental OPP was 0.5 dB for each km added to the optical distribution network (ODN) whereas the simulated OPP was 0.24 dB/km.

Keywords: PON, NG-PON2, TWDM, OptSim, Matlab, OOK, NRZ, Bit Error Rate, Optical Path Penalty.

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica (mención Telecomunicaciones) - Universidad Politécnica Salesiana, UPS - sede Quito.

1. Introducción.

La creciente demanda de ancho de banda por parte de los usuarios, debido al incremento de las aplicaciones streaming y de tráfico recursivo, y a la tendencia a la conectividad global de dispositivos y cosas IoE (Internet del todo), ha hecho que se propongan nuevas soluciones para redes de acceso y transporte de datos.

Particularmente en el año 2015 se lanzó la versión final del estándar NGPON2 como la primera opción de una red óptica de acceso de nueva generación que utiliza la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en conjunto con la multiplexación por división de tiempo (TDM) para lograr una red óptica pasiva (PON) con capacidad entre 40 Gb/s hasta 80 Gb/s por cada transceptor.

El principal reto de NG-PON2 fue que las tecnologías existentes como XG-PON ofertado por la ITU y 10G-EPON ofertado por IEEE coexistieran bajo un mismo escenario [1].

NG-PON2 fue propuesto por Full Service Access Network (FSAN) con el propósito de alcanzar velocidades de 40 Gb/s en downstream y upstream a una distancia mínima de 40 km utilizando una tasa de división de 1:64 [2].

FSAN realizó una evaluación comparativa de varias opciones tecnológicas tales como TDM-PON, WDM-PON, OFDM-PON las cuales no cumplieron de forma individual los requerimientos del operador de red. Por lo tanto, se optó por la fusión de tecnologías llegando a conseguir un presupuesto óptico de pérdida con

redes de distribución óptica (ODN) pasivas, con compatibilidad de tecnologías existentes e implementadas, sistemas eficientes, capacidad para ofrecer servicios de backhaul con baja latencia y de un alto ancho de banda, estos fueron factores primordiales para la elección de TWDM como tecnología principal para NG-PON2 [1].

La ODN mantiene las 4 clases de pérdidas de trayectoria óptica (OPL) especificadas en NG-PON1, dichas clases permiten la reutilización de infraestructura ya instalada [3].

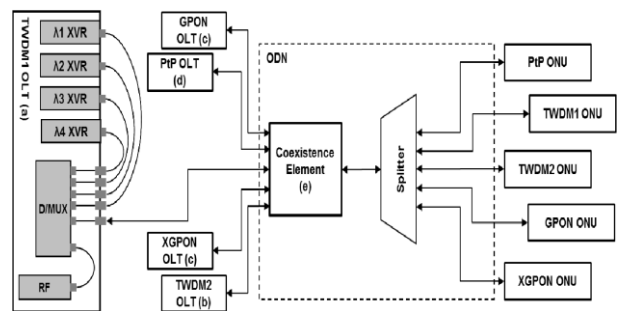


Fig. 1. Coexistencia de tecnologías- arquitectura de red NG-PON2 [4]

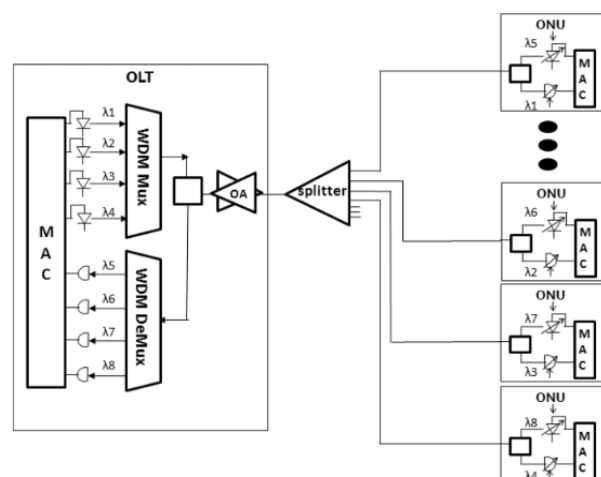


Fig. 2. Diagrama sistema TWDM-PON [2]

Los principales estándares proporcionados por la ITU para el estándar NG-PON2 son G989.1 (requisito de la capa física), G989.2 (especificaciones de la capa física), G989.3 (recomendaciones de protocolo) [1].

La fibra monomodo sufre poca dispersión temporal y su ancho de banda está en el rango de los GHz [5].

La transmisión de datos sobre un enlace de fibra óptica se ve limitado por fenómenos que causan distorsión en la forma del pulso óptico los cuales alteran la información y condicionan el óptimo desempeño de los sistemas de comunicación ópticos [6]; estos fenómenos pueden ser de dos tipos: efectos lineales como la dispersión cromática, atenuación y efectos no lineales como la modulación de auto-fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y mezclador de cuatro ondas (FWM) presentes en la fibra debido a la dependencia del índice de refracción con la potencia y la longitud de onda emitida por el láser [7].

La dispersión intramodal o cromática expresada en $\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ se da por el ensanchamiento del pulso debido a los retardos existentes de las componentes espectrales, las cuales pueden ser provocadas debido a que el rayo incidente no es monocromático, además, por propiedades dispersivas del material de la fibra y de la guía de onda. La deformación del pulso es directamente proporcional a la longitud de la fibra y al ancho espectral de la fuente óptica. La dispersión temporal intermodal o dispersión modal se presenta en fibras multimodo, ya que

son retardos entre distintos modos de propagación [5].

2. Simulación.

Para la etapa de simulación se empleó el software OptSim en co-simulación con Matlab con el fin de emular el diseño de una red downstream NG-PON2. Se transmitió una secuencia binaria pseudoaleatoria de 128 bits a una velocidad de 10 Gb/s utilizando codificación sin retorno a cero (NRZ) sobre un enlace óptico a 20 km, 45 km y 70 km.

Cada uno de los elementos mostrados en el esquema de la Fig. 3. se configuró con los parámetros más aproximados de tal forma que emulen el comportamiento de los equipos reales.

3. Implementación Experimental.

A continuación, se describe cada bloque que interviene en un enlace de transmisión de fibra óptica.

3.1 Terminal de línea óptica (OLT).

3.1.1 Generación de datos.

Se utilizaron 2 generadores de patrones de marca KEYSIGHT, el generador de patrones de pulsos (PPG) del serial BERT N4906B (PPG hasta 12.5 Gb/s), en el cual se generó una secuencia binaria pseudoaleatoria PRBS de 128 bits, codificación NRZ transmitidos a 10 Gb/s y el generador arbitrario de señales (AWG) M9502A (4 canales, 20 GHz de ancho de banda y 65 GSa/s de muestreo), en el cual se cargó el

script de Matlab con una PRBS de 128 bits codificación NRZ transmitidos a 10 Gb/s.

3.1.2 Amplificador de datos.

Fue importante una etapa de amplificación de los datos provistos por los generadores de patrones para esto se utilizó el módulo amplificador SHF S126A, que tiene 20 GHz de ancho de banda, el cual provee hasta 10 Vpp a su salida.

3.1.3 Láser.

El láser de retroalimentación distribuida (DFB) marca IDPHOTONICS modelo CBMA24, controlado por el software CoBrite, se configuró 4 láseres en banda L con una potencia de transmisión de 9 dBm de acuerdo al del plan de longitud de onda para downstream NG-PON2.

Canal	Longitud de onda [nm]	Frecuencia [THz]
1	1596.34	187.8
2	1597.19	187.7
3	1598.04	187.6
4	1598.89	187.5

Tabla 1. Plan de longitud de onda downstream NG-PON2.

3.1.4 Modulador.

La modulación en intensidad de potencia óptica fue realizada de forma externa por medio de un modulador óptico Mach-Zehnder THORLABS serie 8019028, el cual fue configurado con un voltaje de 2.6V y una corriente de 0.85A para alcanzar su punto de trabajo óptimo.

3.1.5 Multiplexor.

Como multiplexor se utilizó un módulo MARCA 100G 1x4 DWDM Mux configurado para los 4 canales en banda L detallados en la Tabla 1.

3.1.6 EDFA

Como amplificador de disparo (booster) se empleó un amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA) de potencia de salida fija de 10 dBm.

3.2 Red de distribución óptica (ODN).

3.2.1 Fibra óptica.

En la ODN se utilizó fibra óptica monomodo estándar (SSMF) G652.D, con una atenuación de 0.25 dB/km, dispersión cromática de 17 ps/nm·km y dispersión dependiente del modo de polarización (PMD) de 0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

3.2.2 Splitter.

Como splitter se utilizó un atenuador óptico variable (VOA) modelo VOA14083773 para poder analizar el desempeño de la red en los escenarios descritos en la sección 4.

3.3 Unidad de red óptica (ONU).

3.3.1 Amplificador óptico de semiconductor.

Para mejorar la calidad del enlace LR-NGPON2 fue necesario el uso del amplificador óptico de semiconductor (SOA) THORLABS SOA1117S, el cual nos permitió amplificar los datos en la ONU, con su punto óptimo de trabajo configurado a 315.4 mA y 6.780 k Ω .

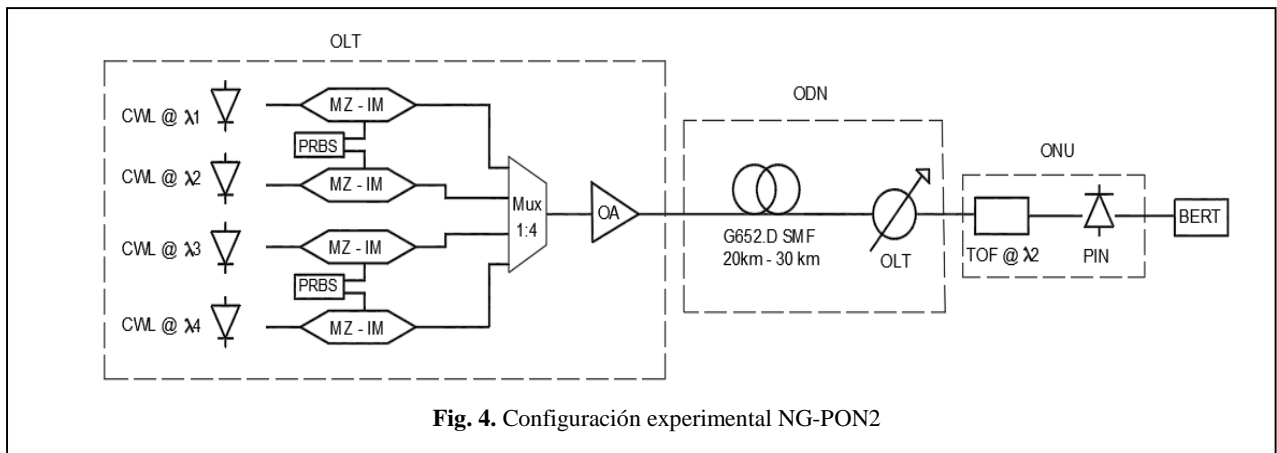
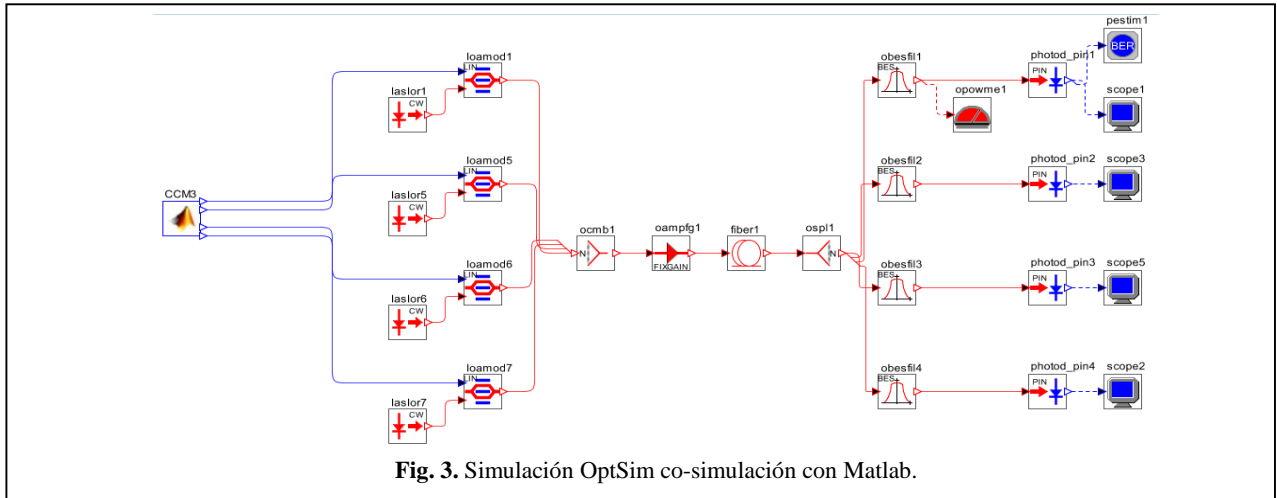
3.3.2 Detección

Para la etapa de detección se usó dos métodos, el primero fue utilizando el fotodetector embebido del osciloscopio Agilent Technologies DCA-X 86100D en el cual ingresa la señal por medio de un patchcord APC/UPC directamente en el canal óptico. El segundo método utilizado fue la detección a través de un fotodetector positive-intrinsic-negative (PIN) modelo LAB BUDDY DSC30S-39-FC/APC-K-2 en el cual ingresa señal óptica y la transforma a una señal eléctrica, para poder ingresar a uno de los canales del osciloscopio de tiempo real (RTO) Keysight DSAV164A, el cual tiene una velocidad de muestreo de 80 giga-muestras por segundo (GSa/s).

4. Escenarios.

La Fig. 4. muestra el esquema de la configuración experimental en la cual se emplean dos variaciones en la ODN para el enlace óptico NG-PON2:

- Enlace óptico fijo a 20 km, 45 km, y 70 km incluyendo un VOA para observar el BER con respecto a la potencia de recepción.
- Enlace óptico variable de 20 km a 30 km con incrementos de 1 km con el fin de observar los efectos de la penalidad de ruta óptica (OPP).



5. Análisis de resultados experimentales.

La Fig. 5. muestra el resultado de la mejor transmisión posible a 20 km, 45 km y 70 km de un enlace óptico downstream NG-PON2. La transmisión a 20 km logra un BER de 10^{-9} con una potencia en recepción de -12.09 dBm, mientras que la transmisión a 45 km logra un BER de 10^{-9} con una potencia en recepción de -11.27 dBm y la transmisión a 70 km logra un BER de 10^{-9} con una potencia en recepción de -9.18 dBm. Además, como se puede observar las mejores condiciones posibles se da en el enlace óptico a 20 km y para lograr las mismas características en un enlace a 45 km existe una penalidad de aproximadamente 1 dB, y a 70 km una penalidad de aproximadamente 3 dB para alcanzar el BER objetivo de 10^{-9} .

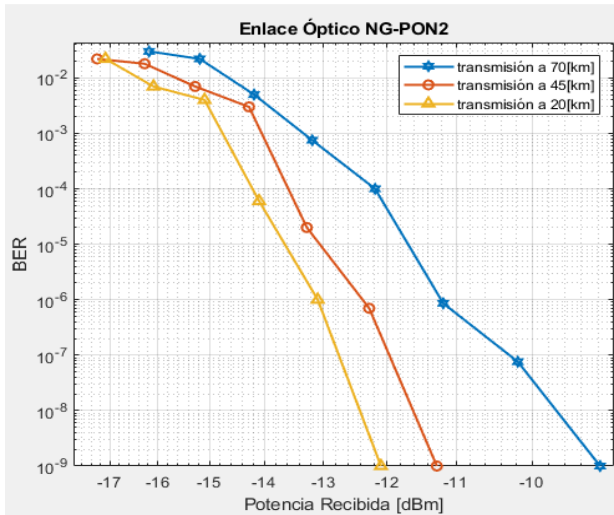


Fig. 5. Enlace óptico downstream NG-PON2, 70 km (azul), 45 km (naranja), 20 km (amarillo).

La Fig. 6. muestra un enlace óptico con SOA en el receptor para una longitud de fibra a 45 km y 70 km. Donde el enlace óptico a 70 km

tiene una penalidad de 2 dB con respecto al enlace de 45 km. Además, se puede apreciar que el uso del SOA a 45 km empeora la señal con respecto a sus mejores condiciones Fig. 5 con una penalidad de 1.8 dB.

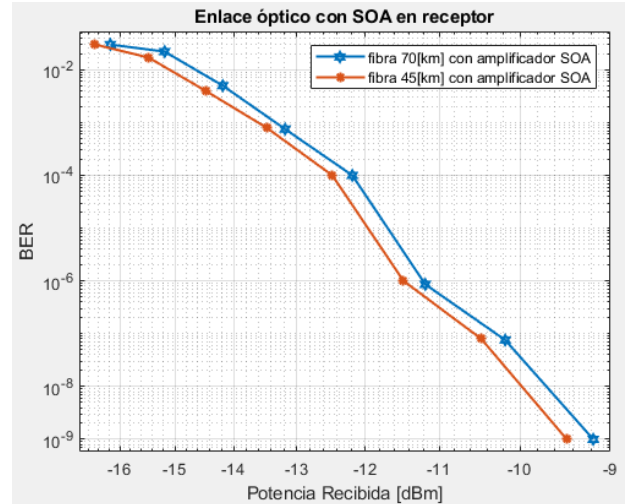


Fig. 6. Enlace óptico downstream NG-PON2 con SOA en el receptor a 70 km (azul) y 45 km (naranja).

La Fig. 7. muestra un enlace óptico sin SOA en el receptor para una longitud de fibra a 45 km y 70 km. Donde podemos apreciar que el enlace a 45 km tiene un mejor desempeño sin el uso del SOA. Además, el enlace óptico a 70 km alcanza un piso de BER de 1.7×10^{-4} .

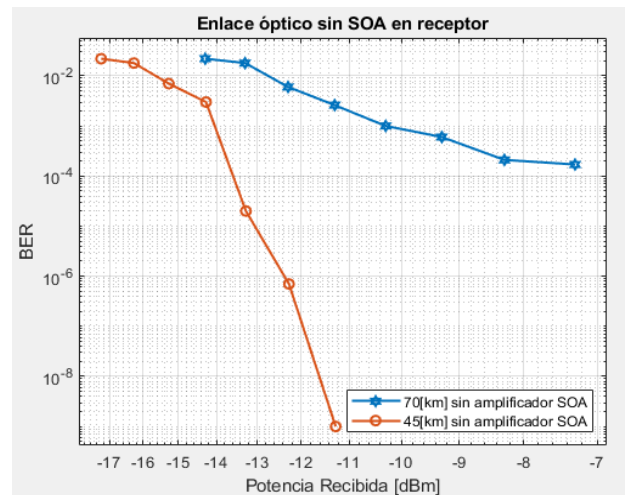


Fig. 7. Enlace óptico downstream NG-PON2 sin SOA en receptor a 70 km (azul) y 45 km (naranja).

La Fig. 8. muestra la OPP, la cual es un parámetro importante que se debe considerar al momento de realizar el presupuesto del enlace downstream NG-PON2.

Como se puede observar a 20 km se tiene una penalidad de 0.25 dB, pero mientras aumenta la longitud del enlace a partir de los 22 km la penalidad parece mantenerse en aproximadamente 0.5 dB/km por cada kilómetro de fibra añadido. De modo que para 30 km hay una penalidad de 3.5 dB con respecto a un enlace de 20 km.

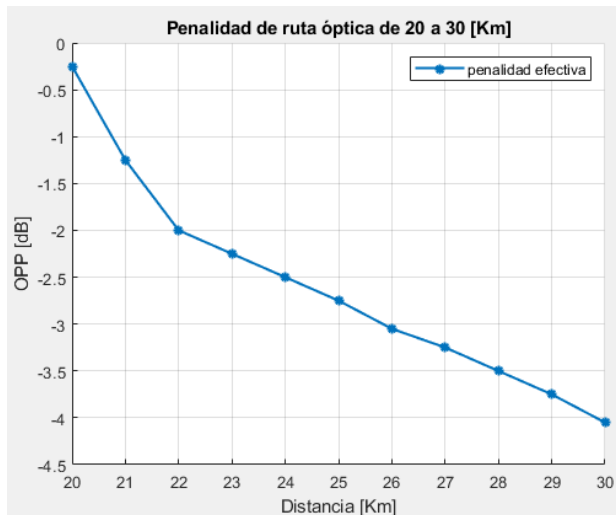


Fig. 8. OPP vs longitud de fibra óptica.

6. Análisis de resultados simulados.

La Fig. 9. muestra el resultado de la simulación, empleando el software OptSim, a distancias de 20 km, 45 km y 70 km de un enlace óptico downstream, en una NG-PON2, considerando las mismas condiciones de transmisión y los mismos parámetros de los dispositivos utilizados en las pruebas experimentales con equipos reales. Se obtuvieron los siguientes resultados: la

transmisión a 20 km logra un BER de 9.42×10^{-13} con una potencia en recepción de -13.4 dBm, mientras que la transmisión a 45 km logra un BER de 9.52×10^{-13} con una potencia en recepción de -11.87 dBm y la transmisión a 70 km logra un BER de 9.24×10^{-13} con una potencia en recepción de -1.85 dBm. Puede observarse que, al respecto de una transmisión con enlace de 20 km, se tiene una penalidad de 1.5 dB para 45 km y una penalidad de 11 dB para 70 km, para un BER objetivo de 10^{-13} . Los resultados son similares a los experimentales en lo que a la penalidad por incremento de la distancia de la ODN se refiere, aunque los valores de sensibilidad obtenidos en la simulación son menos críticos.

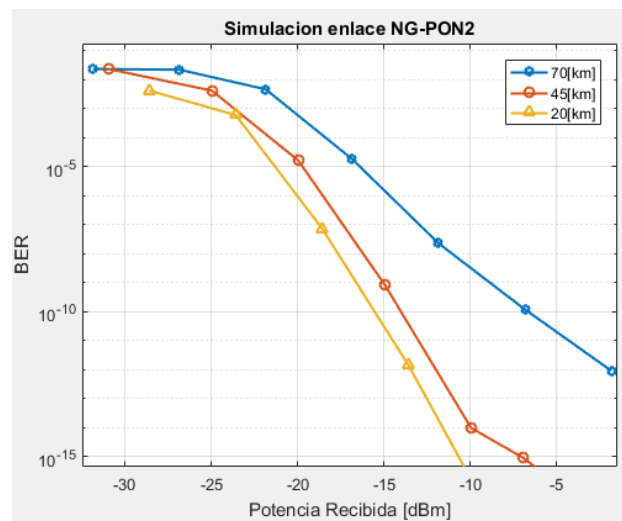


Fig. 9. Enlace óptico downstream NG-PON2, 70 km (azul), 45 km (naranja), 20 km (amarillo).

La Fig. 10 muestra los resultados de la simulación de un enlace óptico con SOA en el receptor para una longitud de fibra a 45 km y 70 km. Donde el enlace óptico a 70 km tiene una penalidad de 0.4 dB con respecto al enlace de 45 km.

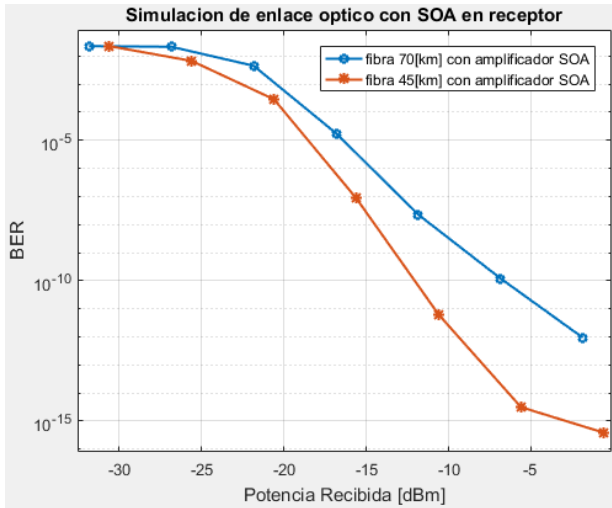


Fig. 10. Enlace óptico downstream NG-PON2, 70 km (azul), 45 km (naranja), 20 km (amarillo).

En contraste, la Fig. 11 muestra los resultados de la simulación para los mismos enlaces de la figura 10, considerando receptores sin SOA. Se corrobora que a 45 km se tiene un mejor desempeño sin el uso del SOA. Además, el enlace óptico a 70 km alcanza un piso de BER de 2×10^{-5} .

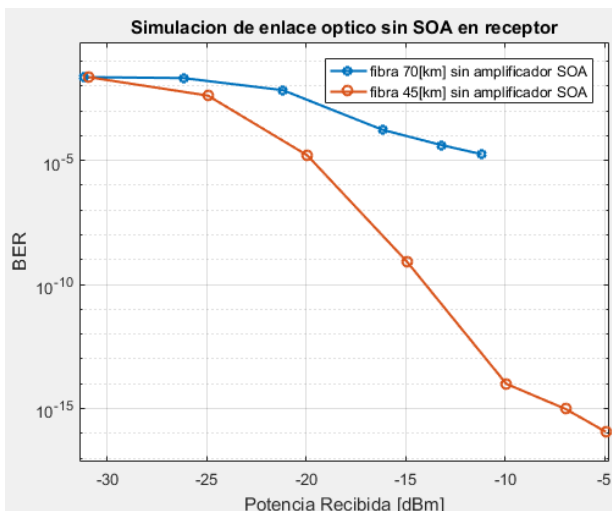


Fig. 11. Enlace óptico downstream NG-PON2, 70 km (azul), 45 km (naranja), 20 km (amarillo).

En cuanto a la OPP, en la Fig. 12 podemos observar que se tiene una penalidad de aproximadamente 0.24 dB por cada km de fibra

que se incremente, lo cual es solo la mitad que la penalidad obtenida experimentalmente. De modo que para 30 km hay una penalidad de 2.6 dB con respecto a un enlace de 20 km.

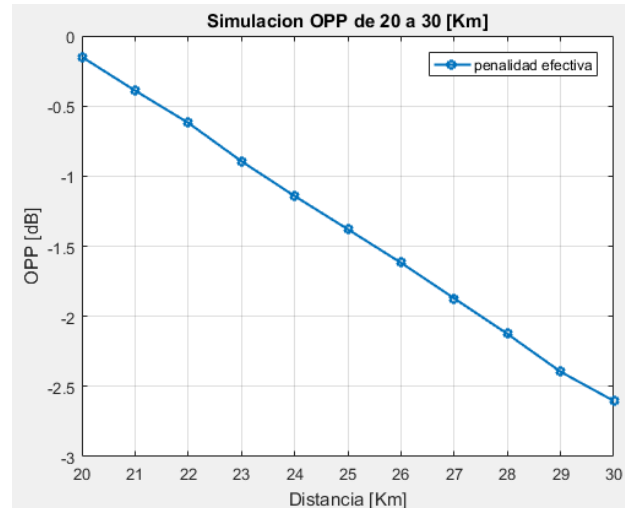


Fig. 12. OPP vs longitud de fibra óptica.

7. Conclusiones.

Se ha demostrado experimentalmente que para lograr tener una LR- NGPON2 la penalidad para alcanzar 45 km con referencia a una distancia tradicional de 20 km es 1 dB y para 70 km es 3 dB.

Mientras que en la etapa de simulación se obtuvo a 45 km una penalidad de 1.5 dB y a 70 km una penalidad de 11 dB con respecto a la distancia tradicional de 20 km.

Con respecto a la OPP, la penalidad experimental para pasar de 20 km a 30 km fue de 3.5 dB, mientras que en la simulación se obtuvo una penalidad de 2.6 dB. Estas penalidades deben ser tomadas en consideración al momento de realizar el presupuesto del enlace NG-PON2.

Una de las principales ventajas de implementar una red LR-NGPON2 es su mayor capacidad de ancho de banda que van desde los de 40 Gb/s hasta 80 Gb/s por cada transceptor. Además, al ser una red Long Reach permite alcanzar distancias superiores comparado con una PON tradicional logrando una cobertura optima a sectores rurales o asentamientos urbanos sin la necesidad de implementar oficinas centrales.

back-propagation,” *instnameUniversidad Pontif. Boliv.*, 2017.

8. Referencias

- [1] D. Nasset, “NG-PON2 Technology and Standards,” *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 1136–1143, Mar. 2015.
- [2] Y. Luo *et al.*, “Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2),” *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 587–593, Feb. 2013.
- [3] J. S. Wey *et al.*, “Physical Layer Aspects of NG-PON2 Standards—Part 1: Optical Link Design [Invited],” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 1, p. 33, Jan. 2016.
- [4] R. Murano, “Optical Component Technology Options for NGPON2 Systems,” in *Optical Fiber Communication Conference*, 2014, p. M3L1.
- [5] José Ramón Sendra Sendra, “Características de transmisión de fibras ópticas,” España, 2015.
- [6] P. A. Castañeda Romero, “Análisis y Simulación del Fenómeno de Dispersión Cromática en la Fibra Óptica Monomodo ITU-T G.652 e ITU-T G.655,” Mar. 2018.
- [7] J. Álvarez Guerrero, “Compensación de los efectos de la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticos coherentes mediante algoritmos de procesamiento digital de señales basados en filtros adaptativos y en el algoritmo